

Desenvolvimento de dispositivo de imageamento through-wall de aplicações em defesa nacional e segurança pública

Ramyses de Macedo Rodrigues^{1,2}, Eduardo X. F. G. Migon^{3,4}, João C. Sanches⁴, Alexandre W. de Souza^{5,4}, Pedro F. Caballero Campos^{4,7}, Fernando M. Araújo-Moreira^{2,4,6}

¹Departamento de Polícia Federal, Superintendência Regional do Piauí, Teresina/PI – Brasil

²Programa de Pós-graduação em Biotecnologia, Universidade Federal de São Carlos; Caixa Postal 676, São Carlos/SP 13565905 – Brasil

³Exército Brasileiro, Instituto Meira Mattos, Escola de Comando e Estado-Maior do Exército, Praia Vermelha, Rio de Janeiro – Brasil

⁴NEEDS – Núcleo de Estudos Estratégicos em Defesa e Segurança; Universidade Federal de São Carlos; Caixa Postal 676, São Carlos/SP 13565905 – Brasil

⁵Polícia Militar do Estado de São Paulo, 38 BPM/CPI 3; São Carlos/SP 13565905 – Brasil

⁶Departamento de Física; Universidade Federal de São Carlos; Caixa Postal 676, São Carlos/SP 13565905 – Brasil

⁷Divisão de Defesa Civil, Prefeitura Municipal de São Carlos, Rua Totó Leite, 99 - Jardim Ricetti, São Carlos/SP, 13570010 – Brasil

Resumo – Neste projeto foi desenvolvido um dispositivo de obtenção de imagens de alta resolução do tipo *through-wall* para identificação de características biométricas e bioestruturas através de anteparos. Esta nova plataforma tecnológica, baseada na arquitetura de radares, é capaz de detectar indivíduos ou animais que estejam ocultados por um anteparo opaco (parede ou muro). Este dispositivo possui diversas vantagens em relação ao similar importado, tais como um novo conceito de detecção, tecnologia à prova de obsolescência, devido ao uso de componentes oriundos da tecnologia de redes *wi-fi*, maior robustez, menor peso, maior portabilidade, capacidade de extração de características biométricas de indivíduos e, principalmente, de baixo custo. Esta plataforma de detecção pode ser também ajustada – sem variações significativas no seu custo, para localizar praticamente qualquer tipo de objetos, desde pessoas soterradas até carregamentos de armas ou entorpecentes. A plataforma pode ser aplicada como instrumento de apoio a ações de Inteligência.

Palavras-Chave – *through-wall*, radar, segurança pública, defesa civil, defesa nacional;

I. INTRODUÇÃO

A tecnologia torna-se uma poderosa aliada às forças de defesa nacional, inteligência, defesa civil e segurança pública, pois promove um aumento substancial da eficiência das ações, oferecendo recursos e funcionalidades que seriam impossíveis de serem executadas por seres humanos, minimizando os riscos à segurança dos agentes, das vítimas imediatas e da circunvizinhança, em especial em intervenções em situações de terrorismo e de defesa civil. Dispositivos de visão noturna, capacidade de detectar armas de fogo, detecção e mensuração de velocidade de veículos ou aeronaves à distância, entre outros, são exemplos de como a tecnologia pode contribuir para a eficácia do trabalho nessas áreas sensíveis.

Nesse contexto, surge a proposta de um dispositivo que agregue recursos tecnológicos e que contribua para o sucesso nas missões de segurança e socorro, especialmente naquelas que envolvam a necessidade de se adentrar em um ambiente desconhecido (i.e. em operações/invasões táticas ou em estruturas colapsadas), sem possibilidade de visualização do seu interior. Detectar a presença de indivíduos nesses ambientes é o objetivo básico do presente projeto, podendo o mesmo ser aplicado em diversas áreas de atuação, como nas

ações de bombeiros e de defesa civil, localizando vítimas sob escombros, na resposta policial a situações de cárcere privado ou homiziamento de infratores e vítimas em edificações, no combate militar em ambiente urbano ou confinado (p. ex. aeronaves) e nas ações contraterrorismo, ou seja, em todas aquelas situações em que seja fundamental localizar indivíduos ocultados por anteparos opacos, buscando, sobretudo a eficiência operacional na preservação de vidas humanas e a mitigação de resultados não esperados. Permite também que a inteligência identifique, com detalhes, os alvos e os óbices à execução de ações de defesa e segurança.

II. DESENVOLVIMENTO DO DISPOSITIVO

O princípio de funcionamento do dispositivo proposto neste projeto [1,2] é muito semelhante ao dos radares biestáticos (equipado com duas antenas, uma transmissora e outra receptora [1]), diferindo no fato de que a visão dos alvos está obstruída por uma parede (anteparo opaco). A ação dos circuitos eletrônicos componentes do *front end* do equipamento e a propagação da OEM nos meios serão simuladas através de algoritmos computacionais apropriados e o tratamento dos dados coletados realizado conforme descrito em [1,2]. O resultado é uma imagem digital contendo as informações desejadas de alvos humanos ou outras estruturas biológicas de dimensões detectáveis.

Para isso, o sinal eletromagnético irradiado pela antena transmissora do equipamento, em uma direção determinada, deverá transpassar a obstrução, atingir o alvo e uma fração dele ser enviada de volta (na forma de *eco*) ao dispositivo para ser captado pela antena receptora. No caso *in concreto*, a primeira indagação de projeto é se a perda de energia experimentada pelo sinal nos trajetos de ida e de volta do *eco*, nessas condições, ainda permite sua correta detecção pela antena receptora. Sabe-se que essa perda dependerá da frequência de operação, do ângulo de incidência bem como do próprio material componente da parede [3,4].

Os principais parâmetros de funcionamento do dispositivo, tais como potência e a frequência de operação, arquitetura dos circuitos eletrônicos, ganho dos amplificadores, além do tipo e ganho das antenas transmissora e receptora, foram selecionados com base nas características desses meios obstrutivos (paredes) esperados em sua normal operação no

Brasil [1], bem como das dimensões e características elétricas dos alvos desejados (indivíduos humanos).

Rudd [3] e Itu [4] demonstraram que os meios compostos pelas paredes são, em geral, não magnéticos e não ionizáveis, significando que ainda será possível obter boas aproximações se forem consideradas apenas as propriedades dielétricas de seus materiais componentes. Os cálculos da permissividade complexa tornam-se, além disso, mais simples se os meios forem considerados homogêneos, sendo, portanto, utilizada como parâmetro uma permissividade efetiva (permissividade equivalente a um meio homogêneo com os mesmos coeficientes de Fresnell). Apesar da homogeneidade desses meios não ser essencialmente verdadeira, pois na construção de uma parede haverá diferenças de densidades de argamassa, granularidade, misturas de materiais e até mesmo defeitos nos elementos construtivos, essa aproximação é válida para a maioria das alvenarias de vedação, visto que esses fenômenos têm dimensões bem menores do que o comprimento de onda dos sinais eletromagnéticos utilizados.

Os parâmetros de permissividade complexa efetiva de elementos estruturantes e de vedação utilizados na construção civil brasileira foram extraídos da literatura [3,4], baseados, em geral, na frequência de operação de sistemas de telefonia móvel celular e redes *wi-fi*, considerando-se, ainda, meios isotrópicos, homogêneos e não magnéticos.

Em relação à quantidade de eco proveniente de um alvo humano, esta depende da orientação e dimensões do indivíduo a ser detectado, sendo o sinal eletromagnético refletido quase que totalmente na sua pele. O parâmetro físico que determina, de maneira geral e dependente da frequência, a quantidade de reflexão de um alvo em um sistema de radar é a Seção Reta de Radar (ou RCS, *Radar Cross Section*), expresso em unidade de área. O RCS médio para um indivíduo humano é de 1 m^2 , ou 0 dBm [5].

III. SIMULAÇÃO NUMÉRICA COMPUTACIONAL

A - Apresentação do ambiente virtual

A irradiação e propagação da OEM através dos meios e a ação dos circuitos eletrônicos do dispositivo foram implementadas através de simulações computacionais em um ambiente de aplicação composto por uma área de trabalho (Fig.1) com alvos que apresentam características elétricas de indivíduos humanos e com visão obstruída por alvenarias de vedação, implementado em linguagem C/C++, juntamente com um algoritmo de governança da propagação (FDTD).

Algoritmos efetivos realizam o processamento digital dos sinais coletados, utilizando paralelismo de processadores, e técnicas de construção e realce promovem a geração da imagem a ser exibida pelo dispositivo ao operador.

No ambiente virtual, a obstrução (parede) e os alvos são posicionados no plano definido pelos eixos coordenados X e Y, graduados em metros, conforme indicados, e terão propriedades elétricas cujos valores constam em [1]. Cada alvo humano é modelado por uma camada de epiderme seguida por uma camada interna de gordura. A interface gráfica foi preparada para exibir diversos valores da simulação, além da própria interação da onda eletromagnética com a parede e os

alvos. O intervalo de tempo utilizado para executar um passo de iteração do algoritmo também foi computado para fins de avaliação de desempenho da máquina computacional de trabalho e a seleção dos parâmetros da simulação.

As antenas transmissora (TX) e receptora (RX), virtuais, são posicionadas atrás da obstrução e são formadas, cada uma, por um arranjo linear dipolos, o que permite a geração de um feixe relativamente estreito e seu direcionamento eletrônico através da manipulação da fase e da amplitude da alimentação de cada um de seus elementos [5].



Fig. 1 - Interface gráfica do ambiente construído para simulação numérica computacional; função dos campos da área de trabalho: “eps parede”: permissividade elétrica relativa efetiva da parede; “sigma”: condutividade elétrica efetiva da parede; “Tickness”: espessura da parede, em metros; “Att RX1 -> RX2 (dB)”: atenuação medida entre dois pontos de teste inseridos na área de trabalho com o clique do mouse; “Freq”: frequência da onda; “Grid”: dimensões da área de trabalho, em metros; “Tempo de passo do FDTD”: intervalo de tempo de cada interação do algoritmo (atualização dos campos) e indicação de execução do programa; “Emax”: campo elétrico. As duas curvas inferiores exibem a forma de onda do sinal coletado no domínio do tempo ou no domínio da frequência [1].

Fatores de ganho, que podem ser inseridos manualmente no aplicativo, modelam a ação do amplificador de potência, conectado à antena TX e fornecendo a ela o sinal que será irradiado, e do LNA (amplificador de baixo ruído – *Low Noise Amplifier*), conectado à antena receptora, o qual fornece alguma potência ao eco recebido a fim de torna-lo útil aos circuitos subsequentes.

A propagação da OEM através do ambiente virtual é coordenada pelo algoritmo de Yee [6] que foi desenvolvido objetivando a aplicação das equações de Maxwell em um ambiente computacional. Sua implementação no domínio do tempo discreto foi realizada através do método FDTD (*Finite Difference Time Domain*), com uma grid de 420×420 células e como condições de absorção de fronteira a técnica PML (*Perfectly Matched Layer*) de acordo com metodologias propostas na literatura [7].

Como o tamanho da grid está diretamente ligado às dimensões do ambiente virtual e, por conseguinte, à quantidade de recursos computacionais exigidos para a sua execução e o tempo gasto pela simulação, foi necessário encontrar uma combinação ótima entre esse parâmetro e as dimensões máximas do ambiente simulado, bem como entre a

construção de uma grid 2D ou 3D. Com os parâmetros adotados acima, e outras otimizações no algoritmo, uma única varredura no ambiente leva 54 minutos para ser simulada na máquina computacional de 6 núcleos @2,30 GHz, 12 threads e 32 GB de RAM. Se a grid for aumentada para 450 x 450, o mesmo processo levará 1h40min para ser executado.

No algoritmo de Yee, o avanço discreto dos campos elétrico e magnético da OEM é calculado em passos de tempo e de deslocamento espacial definidos. Os campos da iteração atual são obtidos com base nos campos resultantes da iteração anterior. Os meios materiais pelos quais a onda propagar-se-á são estabelecidos virtualmente através da inserção dos valores de permissividade e condutividade nas posições espaciais correspondentes na grid. Dado o uso intensivo de recursos computacionais em cada passo do algoritmo, foi utilizada a API disponível no pacote de recursos do Visual Studio para o paralelismo de processadores. Para o desenho da onda eletromagnética na tela, bem como de todos os demais objetos gráficos, como curvas e caracteres, foi utilizada a API de código aberto OpenGL.

B – Seleção da frequência de operação

Antes de iniciar a simulação, é preciso primeiramente estabelecer uma frequência de operação para o dispositivo proposto. A escolha dessa frequência deve levar em consideração diversos fatores que, de algum modo, influenciarão no desempenho e sensibilidade da detecção.

Tem-se, por um lado, a questão da portabilidade do equipamento: quanto maior for a frequência de operação, menor será o tamanho necessário para as antenas; quanto menor o comprimento de onda, menores serão os efeitos da difração nos alvos pretendidos, havendo melhor aproveitamento da reflexão e conseqüente resolução, e mais próximo da antena estará a zona de Fraunhofer (campo de irradiação).

No entanto, sinais com frequências mais altas terão menor capacidade de penetração e transmissão pelas paredes, visto que a constante de atenuação aumentará proporcionalmente [5]. Conforme a correspondente curva de refletância [1], a reflexão nos alvos humanos também será afetada, pois menor será a diferença de impedâncias características entre o espaço livre e o meio biológico. Maior parcela da onda será transmitida para dentro do tecido humano e maior será sua condutividade sendo mais rapidamente absorvida nele e nas camadas mais internas do corpo humano.

Então, para que se possa manter um comprimento de onda que permita a detecção eficiente dos alvos com as características elétricas desejadas, ao mesmo tempo em que se mantém um sinal que não seja demasiadamente atenuado pelas paredes, fora da faixa de frequência já atribuída a outros sistemas, como *Wi-Fi* ou telefonia móvel celular, escolheu-se, inicialmente, a frequência de operação em 3 GHz, a mesma já utilizada para a obtenção de boa parte dos parâmetros constitutivos das paredes.

De acordo com o Plano de Atribuições da Anatel, a faixa de frequência em torno de 3 GHz é destinada à radionavegação, podendo ser utilizada, no entanto, em equipamentos de radiação restrita, como é o caso do

dispositivo proposto. A resolução 680 da Anatel, publicada em 27 de junho de 2017, estabelece que os equipamentos de radiação restrita devem operar em faixas e com limites de emissão específicos. A que se enquadra na frequência proposta é a faixa de 2,9 GHz a 3,26 GHz. Assim, para o equipamento aqui proposto poder operar regularmente não há necessidade de autorização daquele órgão governamental, desde que tenha a sua certificação homologada.

Todos os demais parâmetros e componentes elétricos do sistema, tais como o processo de fabricação da placa de circuito impresso, cabos de transmissão, tipos de conectores, entre outros, serão selecionados para montagem física considerando-se sua frequência de operação.

C - Descrição das antenas do dispositivo

A antena é o item de maior dimensão do sistema, sendo seu desempenho fator de grande impacto na capacidade de detecção e discriminação dos alvos. Assim, assumindo um compromisso entre a portabilidade, ganho e diretividade, o elemento irradiador/receptor do dispositivo será composto por dois arranjos lineares de sete elementos dipolo de meio comprimento de onda, um para transmissão, outro para recepção, distanciados também de meio comprimento de onda (o que para uma frequência de operação de 3 GHz é de 10 cm). A polarização da onda irradiada será a mesma da direção dos elementos da antena, o que poderá auxiliar na eliminação de reflexões espúrias no ambiente, e pode ser modificada simplesmente racionando o conjunto em 90°.

Na antena transmissora, cada elemento é excitado individualmente com controle de fase e amplitude e modo binomial, o que elimina lóbulos secundários e permite a concentração da energia irradiada em uma direção específica (Fig. 2). Numa realização prática, o conjunto pode ser montado na vertical ou na horizontal, fabricado sob uma placa de circuito impresso, dando-lhe ainda mais portabilidade e promovendo uma maior redução de custos. Um refletor traseiro confere maior concentração de potência na direção desejada, aumentando o ganho do conjunto.

O cálculo de ganhos de antenas, a modalidade de excitação binomial e de diagramas de irradiação são detalhados na literatura [8] havendo inúmeras ferramentas na internet para a sua construção. O ganho aqui considerado, levando em conta o arranjo e o efeito do refletor traseiro, foi calculado em 14,17 dBi, enquanto o valor do ângulo de feixe de meia potência horizontal foi de aproximadamente 24°.

A antena receptora também é composta por sete elementos dipolos de meia onda. Cada elemento alimenta um manipulador de fase (*Phase Shift*) que insere no sinal recebido um atraso que dependerá da direção desejada de recepção (Fig. 3a). As fases são, então, somadas, permitindo que a combinação seja máxima apenas para aquela frente de onda proveniente da direção desejada.

A montagem das antenas na horizontal ou vertical é mostrada na (Figuras 3b e 3c), separadas por um plano condutor para minimizar o *crossstalk* (excesso de recepção dada a proximidade das antenas). A propriedade da reciprocidade permite estabelecer, para a antena receptora, um ganho teórico de 14,17 dBi.

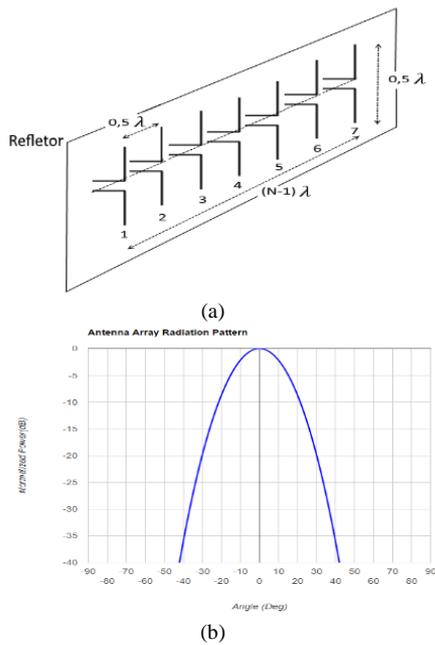


Fig. 2 – Conjunto de antenas e diagrama de radiação [1]: (a) arranjo linear horizontal de sete dipolos de meio comprimento de onda. A polarização da onda irradiada, nesse caso, é vertical. Rotacionando o conjunto 90° em qualquer sentido, muda a polarização para horizontal; (b) diagrama de radiação horizontal normalizado resultante com excitação binomial (onde se verifica a ausência de lóbulos secundários).

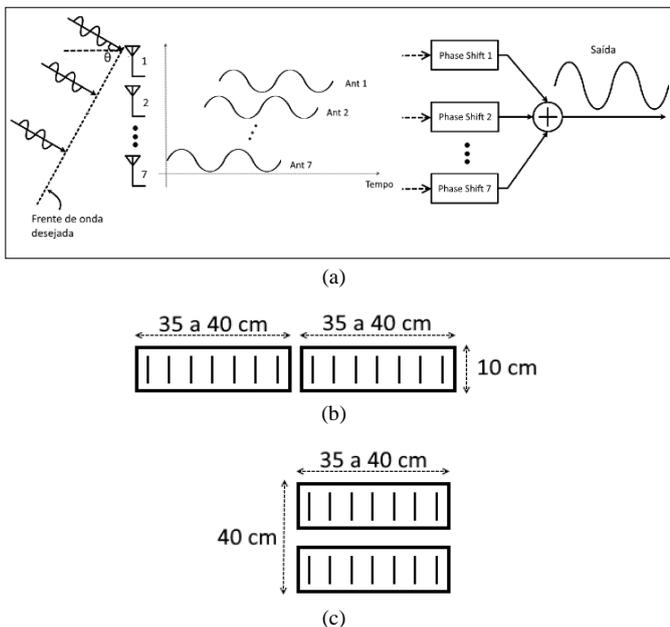


Fig. 3 - Funcionamento da antena receptora e montagem [1]: (a) as fases de cada elemento do conjunto são somadas após sofrerem atrasos proporcionais à direção de recepção desejada; (b) montagem horizontal (considera o tamanho do refletor traseiro); (c) montagem vertical.

A eficiência dessa antena foi verificada virtualmente no próprio ambiente de aplicação, onde é possível ver na Fig. 4 o resultado simulado da emissão de um pulso gaussiano de 3 GHz através de uma parede de espessura 10 cm, permissividade complexa relativa de $2.1 + j0.30$ (alvenaria de

vedação composta por blocos de cimento), na direção de alvos circulares, de raio igual a 15 cm, com uma camada de permissividade relativa de $36 + j10,46$ (parâmetros elétricos do tecido epiderme, obtidos na literatura).

O sucesso da detecção é materializado no contraste entre os níveis de sinal de eco e o nível estacionário da antena receptora.

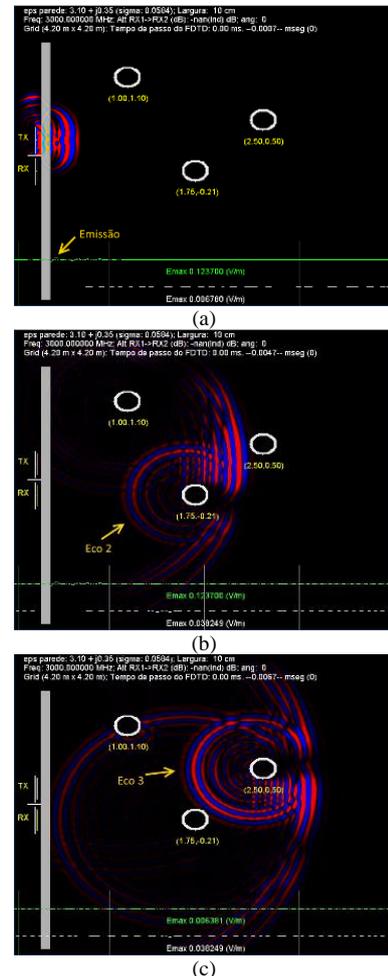


Fig. 4 – Verificação do desempenho da antena utilizada na simulação. (a) (c): pulso gaussiano emitido na direção dos alvos, após propagar-se através da parede e reflexão nos alvos, com captura de ecos.

IV. RESULTADOS OBTIDOS

Posicionando-se alvos em diversos pontos da área de trabalho do ambiente de aplicação virtual e inserindo-se paredes com características elétricas diversas, conforme os dados colhidos da literatura para vários tipos de alvenarias de vedação, foi possível verificar a potencialidade operacional do dispositivo proposto.

O sinal irradiado de forma simulada na direção dos alvos foi modulado no esquema FMCW, sistema no qual o atraso do eco é medido através da frequência instantânea do eco em relação àquele transmitido. Sinais de referência e de eco são multiplicados (simulando dessa forma sua aplicação em um circuito *mixer*), resultando em componentes de frequência que são a soma e a diferença das frequências dos sinais de entrada.

A frequência soma é eliminada por filtragem, sendo a frequência diferença proporcional à distância do alvo.

Para que o sistema perceba os objetos no ambiente, faz-se o feixe direcional deslocar-se da esquerda para a direita, em passos de ângulo determinados, realizando assim uma varredura. É esse esquema que permitirá que o dispositivo perceba objetos dentro de um campo de visão, sendo as variações encontradas ao longo do deslocamento angular enviadas aos estágios de processamento digital de sinais, os quais gerarão a imagem dos alvos pretendida. Para discriminar alvos de interesse de outros objetos, pode-se realizar a detecção de movimento ou comparação através das dimensões dos mesmos.

A Fig. 5 mostra o resultado de uma varredura para uma configuração sem obstruções e um alvo posicionado à frente de uma parede. A imagem resultante após o processamento digital dos sinais é exibida na Fig. 5d.

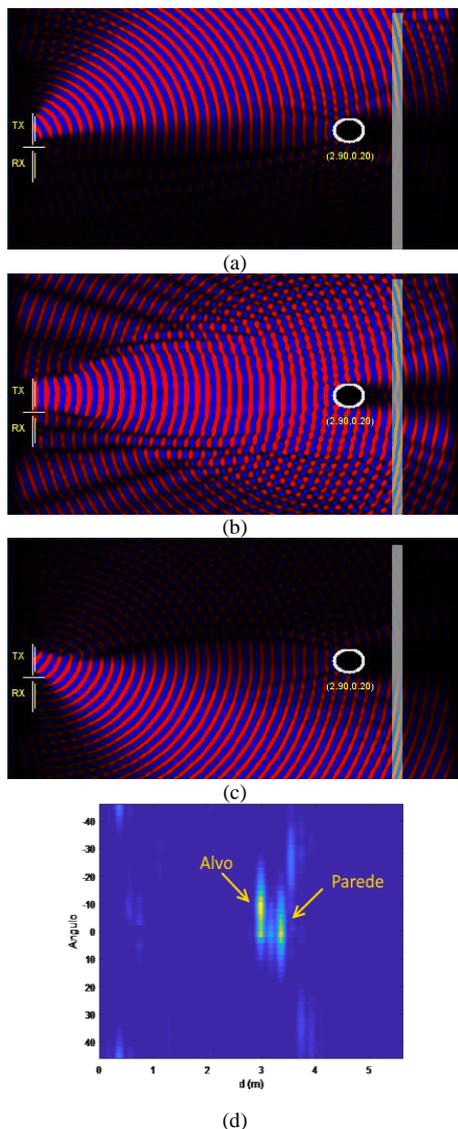


Fig. 5 – Processo de varredura simulado e imagem resultante: (a) início da varredura; (b) varredura em curso; (c) final da varredura; (d) imagem resultante após processamento dos sinais.

As medidas biométricas podem ser realizadas na própria imagem, similarmente ao que é feito com equipamentos de diagnóstico médico (p. ex. ultrassom). A Fig. 6 mostra que a medição da altura de indivíduos é viável. A precisão, todavia, é limitada pela frequência da onda utilizada, que foi selecionada a partir de um *trade-off* entre resolução e capacidade de penetração dos sinais nas paredes e reflexão na superfície do corpo humano. Para se obter uma imagem de melhor resolução com esse comprimento de onda, uma solução é concentrar o feixe em um ponto focal através da manipulação das fases dos elementos da antena transmissora, sendo isso, contudo, objeto de trabalhos futuros.

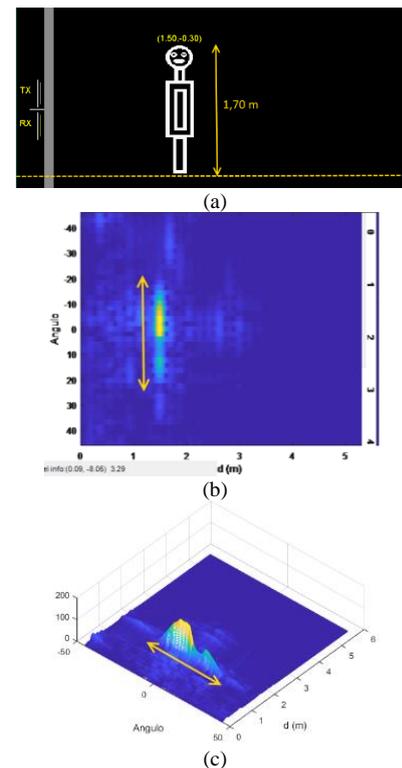


Fig. 6 – medidas realizadas nas imagens geradas pelo dispositivo: (a) Configuração de ambiente com antenas na vertical e alvo de 1,70 metros de altura, distante 1,5 metros do dispositivo; (b) Imagem de indivíduo de 1,70 metros, posicionado atrás de parede com permissividade $2,1 + j0,30$, de 10 cm, gerada com a antena na posição vertical; (c) Imagem em perspectiva dos níveis de intensidade de pixels de (a).

Em um ambiente circundado por quatro paredes, como ocorre em uma edificação convencional, haverá múltiplas reflexões nos limites internos que, por óbvio, também chegarão ao receptor. A directividade da antena é um dos recursos utilizados neste projeto para minimizar esses efeitos, sendo possível produzir uma imagem que ainda discrimina bem os alvos. O processamento digital dos sinais também terá o condão de eliminar outras distorções espúrias.

Alguns dos resultados obtidos são apresentados na Fig. 7 e na Fig. 8, através da exibição de imagens extraídas do sistema. Foram estudados os comportamentos do dispositivo com e sem a aplicação dos recursos de detecção de movimento. Os alvos recebem a designação “A” e as paredes, a designação “P”. Espúrios, a designação “?”.

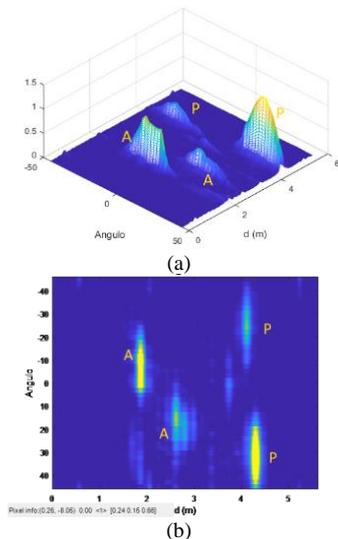


Fig. 7 – Imagem produzida pelo dispositivo proposto em simulação em (a) níveis de intensidade e (b) imagem plana.

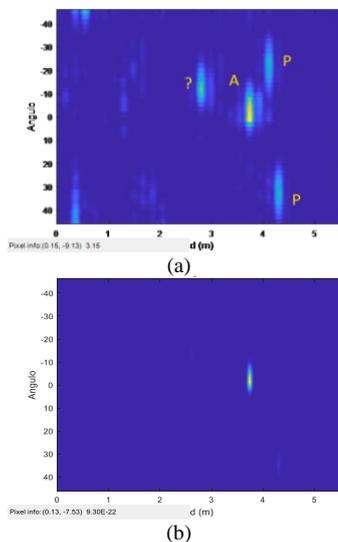


Fig. 8 – (a) imagem produzida pelo dispositivo proposto em simulação com (b) detecção de movimento. Objeto apontado como “?” é espúrio.

V. CONCLUSÕES

O eco proveniente do tecido biológico humano diferencia-se daquele produzido pelas paredes, permitindo o estabelecimento de um contraste na imagem, indicando sua detecção. Em algumas configurações, reflexões espúrias não são totalmente eliminadas pelo sistema ou então interferem construtivamente com o sinal recebido, fazendo surgir nas imagens falsos alvos. Esse problema pode ser contornado com a detecção de movimento, já que, em geral, espera-se que indivíduos humanos não fiquem imóveis por muito tempo.

Rotacionar a antena modifica a polarização do sinal emitido e pode auxiliar na eliminação dos espúrios. Em incidências normais à superfície da parede, haverá maior reflexão na direção da antena do radar, independente da polarização. No uso real, o operador do dispositivo terá esses

recursos à disposição de modo selecionável, para que o mesmo realize uma análise nas imagens obtidas.

O melhor posicionamento do dispositivo é junto à parede, fazendo a onda irradiada pela antena transmissora penetrar diretamente no meio de obstrução. Para alguns tipos de parede, tais como construídas em madeira, no entanto, imagens viáveis podem ser produzidas colocando o radar a alguns metros da obstrução. Na parede de concreto armado com malha dupla não foi possível detectar o alvo, mesmo estando este a 50 cm da sua face oposta. Esse tipo de estrutura será uma limitação para o uso do equipamento. Porém, como esse tipo de alvenaria só é utilizado, em geral, na parte estrutural das edificações, como pilares e vigas, há a possibilidade desse empecilho ser contornado operacionalmente, deslocando o aparelho para uma zona mais transparente ao sinal do radar.

As medidas biométricas podem ser realizadas na própria imagem, possibilitando a individualização de alvos detectados para fins de intervenção operacional. A precisão, todavia, é limitada pelo comprimento de onda utilizado. Trabalhos futuros avaliarão a possibilidade de se gerar um ponto focal através de novos esquemas de manipulação de fases dos elementos da antena transmissora. Observa-se também que em algumas medidas, a refração no interior das paredes, as reflexões espúrias e outras interferências promovem um deslocamento dos pixels, ocasionando alguma imprecisão no cálculo de distância. Essa compensação será tratada em trabalhos futuros. Os resultados obtidos claramente demonstram que o dispositivo desenvolvido possui viabilidade técnica, orçamentária e operacional, apresentando grandes vantagens em relação ao equipamento importado de referência. Por se tratar de tecnologia nacional está imune às condicionantes de fabricantes estrangeiros e a contramedidas por eles desenvolvidas. Sua portabilidade também oportuniza ações de inteligência na obtenção de dados.

REFERÊNCIAS

- [1] Rodrigues, R. M. *Projeto e Desenvolvimento de Dispositivo de Imageamento Through-wall de Alta Resolução para Identificação de Características Biométricas e Bioestruturas, com Aplicações na Segurança Pública, Defesa Civil e Defesa Nacional*. 135p. Tese (doutorado). Universidade Federal de São Carlos – UFSCar (2018).
- [2] Patente requerida INPI/PCT (2018).
- [3] Rudd, R. et al. *Building materials and propagation*, final report. Of com. 14th september (2014).
- [4] ITU.T. *Effects of building materials and structures on radiowave propagation above about 100MHZ, ITU-R Recommendation P.2040-1*, July 2015 (2015).
- [5] JOHNSON, R. C. *Antenna Engineering Handbook*. 3th Edition. McGraw-Hill, USA, 1993. 1472p. (1993).
- [6] YEE, K. *Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media*. In: *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 14, no. 3, pp. 302-307, May (1966).
- [7] SULLIVAN, D. M. *Electromagnetic simulation using the FDTD method*. IEEE Microwave Theory and Techniques Society, sponsor. IEEE Press. ISBN 0-7803-4747-1. 165p. (2000).
- [8] Balanis, C. *Antenna Theory Analysis And Design.*; 3th Edition; Wiley-Interscience. (2005).